

平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响

林超文¹, 庞良玉¹, 罗春燕¹, 陈一兵¹, 黄晶晶¹, 涂仕华^{1,*}, 张 鸿^{2,*}

1. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 四川 成都 610066

2. 四川省农业科学院, 四川 成都 610066

摘要: 利用人工降雨装置模拟 3 种不同强度的降雨, 采用模拟径流小区, 研究了四川紫色丘陵区玉米净作条件下雨强及平衡施肥对土壤养分损失量及载体的影响。结果表明: 雨强是影响地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量的最主要因素。在小雨强条件下, 无地表径流及土壤侵蚀发生; 随着雨强的增大, 地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量都急剧增加。磷素和钾素流失总量也随雨强的增加而增加, 而雨强对氮素流失的影响不大。在 3 种雨强条件下, 3 种施肥处理的氮素流失总量表现为: 高氮施肥 > 农户习惯施肥 > 平衡施肥, 平衡施肥能减少氮素流失, 而高氮施肥增加氮素的流失。农户习惯施肥处理的磷流失总量和钾流失总量均高于平衡施肥和高氮施肥两种施肥处理, 在紫色土坡耕地增施钾肥能减少磷、钾养分的流失。

关键词: 平衡施肥; 雨强; 土壤养分流失; 农户习惯

文章编号: 1000-0933(2009)10-5552-09 中图分类号: S154.1, S158.5, X171 文献标识码: A

Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan

LIN Chao-Wen¹, PANG Liang-Yu¹, LUO Chun-Yan¹, CHEN Yi-Bing¹, HUANG Jing-Jing¹, TU Shi-Hua^{1,*}, ZHANG Hong^{2,*}

1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan academy of Agricultural Sciences, Sichuan, Chengdu 610066, China

2 Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Sichuan, Chengdu 610066, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5552 ~ 5560.

Abstract: By employing an artificial rain device, the effects of three rain intensities and three different fertilizer practices on soil and nutrient losses from sloping corn plots were studied using a complete randomized block experiment. Rain intensity was determined to be the main factor influencing the amount of surface runoff, total runoff, and sediment. No surface runoff or soil erosion occurred at low rain intensity. As rain intensity increased, the amount of surface runoff, total runoff, and sediment increased sharply, causing increased losses of P and K. Rain intensity had little influence on the amount of N lost. The amount of N lost was mainly influenced by fertilizer practices, showing a ranking of N loss from low to high respectively: balanced fertilization < farmer practice < high N rate. Obviously, the high rate of N was susceptible to N loss but the balanced fertilization counteracted N losses. The total mounts of P and K lost from the farmer practice were the worst, indicating the crucial role of proper application methods in reducing P and K losses in the purple soil area.

Key Words: balanced fertilization; rain intensity; soil nutrient loss; farmer practice

近年来,随着耕地利用强度加大、化肥施用量增加,由农业活动引起的面源污染问题逐渐受到关注^[1,2]。土壤中的养分流失一般有两个主要途径,一是随地表径流水相和沉积物相的横向迁移;二是随水分下渗形成

基金项目: 国际植物营养研究所资助项目; 国家 973 计划资助项目(2006CB100206); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD05B06); 四川省科技厅应用基础资助项目(2008JY0022-1)

收稿日期: 2008-07-12; 修订日期: 2009-01-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: stu@mail.sc.cninfo.net; ZHH503@163.com

的纵向迁移,即养分的淋失。

国内外对土壤养分淋失,特别是对氮素淋失的研究近年来受到广泛关注。国外^[3~7]采用同位素示踪等技术对氮的淋失研究较多,对氮的地表径流流失研究较少,同时考虑淋失和地表径流流失的研究则更少。在中国北方,主要研究集中在降水条件和灌溉水对土壤氮素淋失的影响^[8,9]以及水稻土的氮素淋失规律^[10~12]。在南方,主要研究集中在红壤养分淋失规律及水稻土的氮素地表径流流失^[13,14]。这些研究主要采用人工降雨方法研究土壤养分流失的主要因素对裸土养分流失的影响^[15~17],但通常把养分淋失与地表径流流失分开研究,全面评估农田养分流失对面源污染的影响受到局限。

紫色土由于土层浅薄,土壤质地轻,土壤发育浅,结构差,土壤保水能力低,土壤饱和渗漏率大(可达 $2 \sim 3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),土壤下渗水量很大,为土壤养分的淋失提供了条件^[18]。同时,紫色土有一个非透水下垫面(母岩),土层薄,保水力低,使很大一部分土壤下渗水又回到地面对地表水造成污染。紫色土丘陵区是四川盆地的粮食主产区,化肥施用量相对较大^[19],降水量大且集中^[20],农田水土流失严重^[21],导致了土体内养分向环境流失的增加趋势。但目前涉及紫色土养分淋失及地表径流流失规律的系统研究几乎是空白。利用人工降雨装置及可收集地表及地下径流的模拟径流小区,研究不同雨强条件下不同施肥水平对土壤侵蚀、地表径流及壤中流比例、土壤养分流失量、土壤养分流失途径、土壤养分流失载体的影响,其结果对完整认识紫色土养分损失途径及影响因素、农业面源污染治理技术创制具有重要科学价值与实践意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

田间试验布设在长江上游沱江水系花椒沟小支流的响水滩上段,位于 $E104^{\circ}34'12'' \sim 104^{\circ}35'19''$ 和 $N30^{\circ}05'12'' \sim 30^{\circ}06'44''$ 之间,属四川省资阳市雁江区松涛镇的响水村与花椒村,平均海拔395 m。该区多年均降雨量为965.8 mm,多雨年1290.7 mm,少雨年725.2 mm,70%分布于6~9月份。年均温 16.8°C ,极端高温和低温分别为 36.5°C 和 -3.6°C 。供试土壤为遂宁组母质发育的紫色红沙土,质地较轻,pH 7.28,有机质含量 $5.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮和碱解氮分别为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $54.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷和有效磷分别为 $0.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾和有效钾分别为 $13.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $97.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤肥力中等。

1.2 试验设计

试验采用3种雨强和3种耕作方式的两因素3水平随机区组设计,重复3次。研究区夏季暴雨多,根据多年气象资料分析^[20],该区域最大小时降雨量达93.0 mm,最大10min降雨量达30.3 mm,每年单次降雨量50~100 mm的有3.7次。因此,本试验设计了 0.972 、 1.741 、 $2.255 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 3种降雨强度,雨量控制为60 mm,降雨历时分别为61.7、34.5、26.6 min。施肥水平 $N 300$ 、 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 两个用量水平,分别记为 N_1 、 N_2 ; $K_2O 0$ 、 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 两个用量水平,分别记为 K_0 、 K_1 ,组成 N_1K_0 (农户习惯施肥)、 N_1K_1 (平衡施肥)及 N_2K_1 (高氮施肥)3个施肥处理。试验共有9个处理,3次重复,共27个试验小区。各处理均另施 $P_2O_5 150 \text{ kg}/\text{hm}^2$,所有处理磷肥均于2007年4月1日施入;钾肥于2007年4月1日施入50%,6月15日施入另外50%;氮肥分别于4月1日、4月25日、5月10日、6月15日施入总量的10%、20%、20%、50%。氮、钾肥兑清水灌窝,磷肥则干施于植株窝内。耕作方式为横坡垄作。供试作物玉米(*L. mays* L.)品种为成单18,种植密度 $42000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,4月1日播种,8月8日收获。

由于前3次施氮肥量少,亦非暴雨季节,因此把研究的重点放在攻苞肥施用(6月15日)后进行。在晴天条件下施用攻苞肥,攻苞肥施用后立即用人工降雨装置对小区进行模拟降雨试验(1d完成1个重复,如遇下雨则顺延)。按下述方法收集地表径流量、泥沙量、地下径流量,并取样分析养分含量,计算不同耕作措施及雨强条件下的土壤养分流失量。

降雨装置采用中国科学院水土保持研究所生产的SR型野外移动式人工模拟降雨器,装置喷头系统为美国V-80100,降雨高度6m,降雨均匀系数在75.0%以上。

模拟降雨试验小区坡度为 10° (四川紫色丘陵区坡耕地的常见坡度),坡向东西,小区面积 8 m^2 (坡长

4m,宽2m)。小区四周用砖砌成,下垫面用混凝土,土层厚度60cm(紫色土坡耕地常见厚度),保持与土面相同坡度收集地下径流。小区坡面下部用集流装置收集地表径流。填埋土壤容重控制在 $(1.3 \pm 0.1) \cdot \text{cm}^{-3}$,经过1年的耕种栽培后基本恢复到原有土壤结构。

1.3 养分损失过程观测方法

每次降雨分3个时段测定地表径流量并取样分析养分含量。降雨结束后在每个径流桶收集浑水样,采用烘干法测定含沙量,并计算全部产沙量。同时,对所接的径流过程样进行过滤,分析每个水样养分含量。由于泥沙养分含量比较稳定,因此每个小区只取一个混合样测定泥沙养分含量。另取表层0~20cm土壤样作为侵蚀泥沙对照。

每次降雨分3个时段测定地下径流量并取样分析养分含量。地下径流一般不含泥沙,因此不做泥沙分析。

1.4 测试项目和分析方法

泥沙主要测定有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮含量。水样测定总氮、总磷、总钾含量。泥沙有机质测定方法为 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法、全氮测定方法为凯氏定氮法、全磷测定方法为 NaHO 碱熔钼锑抗比色法、全钾测定方法为 NaHO 碱熔火焰光度法、碱解N的测定方法为碱解扩散法、有效磷的测定方法为 NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法、有效钾的测定方法为乙酸铵提取火焰光度法;水样全氮的测定方法为铁粉还原凯氏定氮法、全磷的测定方法为钼锑抗比色法、全钾的测定方法为火焰光度法^[22]。

玉米覆盖度采用数码相机照相分析法测定^[23];玉米高度采用直尺测量法测定。

2 结果与分析

2.1 平衡施肥对玉米植株性状及产量的影响

从表1可以看出,与农民习惯施肥(N_1K_0)相比,平衡施肥(N_1K_1)能显著提高玉米植株高度、覆盖度和玉米产量;过量施N(N_2K_1)与农民习惯施肥相比,二者玉米植株高度、覆盖度和玉米产量差异不大。这可能是因为四川盆地丘陵区季节性干旱频繁^[20],增施钾肥后提高了玉米的抗旱能力^[24],从而提高玉米产量;而过量施N无明显增产效果。由于人工降雨雨量仅60mm,在整个玉米生育期的降水量中所占比例较小,对玉米产量及植株性状影响较小,在此不作分析。

表1 平衡施肥对玉米植株性状和产量的影响
Table 1 Effect of balanced fertilization on corn growth and yield

施肥处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	覆盖度 Land coverage (%)	玉米产量 Corn yield (kg/hm^2)
N_1K_0	177b	56b	5236b
N_1K_1	185a	59a	5590a
N_2K_1	177bc	56bc	5340ab

不同小写字母表示差异达5%显著水平;下同 Means with the different letters are significant at 5% levels; the same below

2.2 平衡施肥及雨强对径流量与泥沙量的影响

从表2可以看出,雨强是影响地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量的最主要因素。在小雨强条件下,无地表径流及土壤侵蚀发生;随着雨强的增大,地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量都急剧增加。在大雨强条件下,平均地表径流量是中雨强条件下的2.04倍,平均径流总量是中雨强条件下的1.09倍,平均土壤侵蚀量是中雨强条件下的1.94倍。雨强对地下径流的影响与对地表径流和土壤侵蚀的影响规律有所不同。在中雨强条件下,平均地下径流深最大,为14.56mm;在小雨强条件平均地下径流深次之,为8.23mm;在大雨强条件下最小,平均为11.91mm。

从表2还可以看出,径流系数(径流总量与降雨量的比值)随雨强的增大而增加,在小雨强、中雨强、大雨强条件下的平均径流系数分别为0.18、0.38、0.41。

表 2 雨强及平衡施肥对径流及土壤侵蚀量的影响

Table 2 Effect of rain intensity and balanced fertilization on losses of runoff and sediment

处理 Treatment		地表径流深 (mm) Surface runoff	地下径流深 (mm) Subsurface runoff	径流总深 (mm) Total runoff	侵蚀量 Sediment (100kg·hm ⁻²)
小雨强 Small rain	N1K0	0.00f	15.00a	15.00d	0.00c
	N1K1	0.00f	10.04c	10.04e	0.00c
	N2K1	0.00f	10.69bc	10.69e	0.00c
中雨强 Medium rain	N1K0	15.48b	15.21a	30.69a	633.87a
	N1K1	2.89e	13.59ab	16.48d	123.19bc
	N2K1	5.99d	14.87a	20.86c	166.63b
大雨强 Heavy rain	N1K0	19.8a	7.76cd	27.55b	720.85a
	N1K1	19.25a	6.34d	25.59b	727.43a
	N2K1	10.66c	10.58bc	21.24c	225.43b

从表 2 中还可看出平衡施肥对紫色土坡耕地水土流失有显著的影响。在 3 种雨强条件下,N₁K₁、N₂K₁施肥处理产生的地表径流量、地下径流量、总径流量均小于 N₁K₀处理,而 N₁K₁和 N₂K₁施肥处理间在不同雨强条件下表现出的水土保持效应差异不尽一致。在不同雨强条件下,N₁K₀处理的平均径流系数为 0.41,N₂K₁处理为 0.30,N₁K₁处理为 0.28。表明增施 K 肥,可以有效地减少地表径流、地下径流和径流总量。这可能是增施 K 肥提高了玉米冠层覆盖度,避免了雨滴对地表土壤的直接打击,减少了土壤结皮的产生,增大雨水的入渗量和蓄积量,从而减少径流总量。

2.3 雨强及平衡施肥对径流泥沙中养分浓度的影响

2.3.1 雨强及平衡施肥对地表、地下径流养分浓度的影响

从表 3 可以看出,地表径流 TN 的平均浓度为 2.5 mg·L⁻¹,施肥处理间差异不大。地下径流 TN 的平均浓度为 69.3mg·L⁻¹,是地表径流 TN 浓度的 27.7 倍。在小、中雨强下,地下径流中高 N 处理 TN 的浓度均高于低氮处理,说明在这两种雨强条件下增施 N 肥,提高了地下径流 TN 的浓度;平衡施肥处理的 N 流失始终处于一个较低水平,这与不同雨强条件下平衡施肥处理比其他两个处理的地下径流量低有关。P 在地表及地下径流中的浓度含量都很低,不同处理间差异不大。K 在地表及地下径流中的浓度较高,但差异也不大,可能是因为 P、K 容易被土壤吸附,其在径流中的浓度主要受被土壤吸附力大小的影响。雨强对地表和地下径流中 TN、TP、TK 浓度的影响不大。

表 3 雨强及平衡施肥对地表、地下径流养分浓度的影响

Table 3 Nutrient concentrations in surface runoff and underground runoff as affected by rain intensity and balanced fertilization

处理 Treatment		TN (mg·L ⁻¹)		TP (mg·L ⁻¹)		TK (mg·L ⁻¹)	
		地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff	地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff	地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff
小雨强 Small rain	N1K0	—	67.2	—	0.056	—	5.8
	N1K1	—	51.2	—	0.069	—	5.6
	N2K1	—	79.7	—	0.069	—	6.0
中雨强 Medium rain	N1K0	2.5	63.3	0.063	0.057	5.7	5.9
	N1K1	2.5	59.4	0.061	0.066	6.5	5.8
	N2K1	2.1	97.4	0.057	0.071	6.9	6.4
大雨强 Heavy rain	N1K0	2.5	86.7	0.065	0.055	4.7	7.1
	N1K1	2.5	51.1	0.056	0.060	5.5	6.6
	N2K1	2.6	67.4	0.049	0.067	6.1	6.8
平均 Average	2.5	69.3	0.059	0.063	5.90	6.22	

2.3.2 雨强及平衡施肥对泥沙养分浓度及养分富集率的影响

土壤养分流失与土壤侵蚀一起发生,而土壤侵蚀首先是细颗粒流失,由于细颗粒泥沙对养分吸附作用强,导致了养分流失的“富集”现象^[25],富集程度的大小一般以流失泥沙和土壤养分含量的比值即富集系数表示。

从表 4 可以看出,侵蚀泥沙与基础土样相比,侵蚀泥沙中有机质、全钾、有效钾、全氮的含量都高于基础土样,既紫色土坡耕地侵蚀泥沙中有机质、全钾、有效钾、全氮流失的“富集”现象明显,全磷略有“富集”,有效氮无明显的“富集”现象,这与许多学者对泥沙养分富集率研究工作中得到的结果不完全相同,可能是与 N、P、K 等在紫色土中移动的化学行为与在其他类型土壤中迁移的化学行为存在差异有关。

雨强对泥沙养分浓度有一定的影响。除全磷外,在大雨强条件下侵蚀泥沙中氮磷钾全量和其有效养分的平均浓度均高于中雨强条件下的,即侵蚀泥沙中养分浓度随雨强的增大而增大,养分富集率也随之增大。施肥对侵蚀泥沙中养分浓度的影响不大,有待进一步研究。

表 4 雨强及平衡施肥对泥沙养分浓度的影响

Table 4 Effect of rain intensity and balanced fertilization on the nutrient content in sediment

处理 Treatment		全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail. N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Avail. P (mg·kg ⁻¹)	有效钾 Avail. K (mg·kg ⁻¹)	有机质 SOM (%)
小雨强 Small rain	N1 K0	—	—	—	—	—	—	—
	N1 K1	—	—	—	—	—	—	—
	N2 K1	—	—	—	—	—	—	—
中雨强 Medium rain	N1 K0	0.69	1.1	19.9	44.82	8.56	150.95	0.93
	N1 K1	0.74	1.0	20.2	52.88	8.11	158.33	0.92
	N2 K1	0.66	1.1	21.0	46.50	6.25	166.33	0.55
大雨强 Heavy rain	N1 K0	0.80	1.1	22.4	61.02	8.45	171.00	1.08
	N1 K1	0.83	0.9	21.0	67.69	8.31	167.60	1.03
	N2 K1	0.70	1.0	20.6	56.89	7.35	185.13	0.85
基础土样 Soil nutrients pre-study		0.56	0.9	13.8	54.46	6.26	97.27	0.51
平均富集率 Average accumulative rate		1.32	1.15	1.51	1.01	1.25	1.71	1.75

2.4 雨强及平衡施肥对养分流失量的影响

2.4.1 雨强及平衡施肥对氮素流失量的影响

地表径流总氮流失量随雨强的增大而增大,在小、中、大雨强条件下地表径流总氮流失量平均分别为 0.00、0.24、0.42 kg·hm⁻²。雨强对地下径流总氮流失的影响与对地表径流的影响有所不同,在小、中、大雨强条件下地下径流总氮流失量平均分别为:7.63、7.15、7.37 kg·hm⁻²,小雨强条件下最大。径流总氮流失量由地表径流和地下径流总氮流失量共同决定,雨强对径流总氮流失量的影响不明显。在 3 种施肥条件下,侵蚀泥沙全氮流失量均随雨强的增大而增大,差异均达显著水平($p < 0.05$)。

在 3 种雨强条件下,3 种施肥处理的地表径流、地下径流、径流总氮和氮素流失总量流失量均表现为:平衡施肥 < 农户习惯施肥 < 高氮施肥,其中在大雨强条件下,平衡施肥处理地表径流总氮流失量与其他两施肥处理差异达显著水平($p < 0.05$);在中、大雨强条件下,平衡施肥处理的地下径流总氮、径流总氮流失量和氮素流失总量与其他两施肥处理差异均达显著水平($p < 0.05$)。说明平衡施肥能减少径流总氮流失量和氮素总流失量,而高氮施肥增加氮素的流失。施肥对侵蚀泥沙全氮流失量的影响在不同雨强条件下表现不同,有待进一步研究。泥沙有效氮流失有随雨强增大而增大的趋势。

从表 5 还可以看出,随径流损失的 N 平均为 7.6 kg·hm⁻²,相当于低施 N 量的 2.5%;且主要通过地下径流损失,占氮素总流失量的 88.3% ~ 100.0%,平均为 95.0%,而通过地表径流和泥沙流失的氮占氮素总流失量的比例较小,分别平均为 2.4%、2.6%。泥沙有效氮流失量占泥沙全氮流失的比例较小,变化范围为 5.6%

~14.8%,平均为9.2%。

表 5 雨强及平衡施肥对氮素流失量的影响
Table 5 Effect of rain intensity and balanced fertilization on the nitrogen loss

处理 Treatment		径流氮流失量 N loss runoff (kg·hm ⁻²)			泥沙氮流失 N loss in sediment (kg·hm ⁻²)		总量 Total
		地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff	总量 Total	全氮 Total N	有效氮 Avail. N	
小雨强 Small rain	N1K0	0.00d	7.54bcd	7.54b	0.00e	0.00d	7.54cd
	N1K1	0.00d	7.29cd	7.29bc	0.00e	0.00d	7.29cd
	N2K1	0.00d	8.07abc	8.07ab	0.00e	0.00d	8.07bc
	中雨强 Medium rain	N1K0	0.52ab	7.06de	7.58b	0.43b	0.03ab
	N1K1	0.08d	5.82f	5.9d	0.09d	0.01d	5.99e
	N2K1	0.11d	8.57a	8.68a	0.11d	0.01dc	8.79ab
	大雨强 Heavy rain	N1K0	0.40b	7.68bcd	8.08ab	0.54a	0.03ab
	N1K1	0.25c	6.28ef	6.53cd	0.27c	0.04a	6.81de
	N2K1	0.61ab	8.16ab	8.77a	0.26c	0.02bc	9.03ab

2.4.2 雨强及平衡施肥对磷素流失量的影响

从表 6 可以看出,在 3 种施肥处理条件下,除地下径流总磷流失量外,地表径流总磷、径流总磷、泥沙全磷、泥沙有效磷流失量、磷流失总量均随雨强的增大而增大。

从施肥对磷素流失量的影响来看,在小雨强条件下,施肥对磷素流失量的影响不大。在中雨强和大雨强条件下,地表径流总磷、径流总磷、泥沙有效磷流失量均表现为:农户习惯施肥>高氮施肥>平衡施肥,而磷素总流失量和泥沙全磷流失量在中雨强条件下均表现为:农户习惯施肥>高氮施肥>平衡施肥,在大雨强条件下均表现为:农户习惯施肥>平衡施肥>高氮施肥,说明紫色土增施钾肥能有效减少磷素的流失。

雨强对磷素流失途径的影响表现为,在小雨强条件下,不产生地表径流和土壤侵蚀,磷素仅通过地下径流的途径流失,流失量可忽略不计,仅为 0.004~0.010 kg·hm⁻²;在中、大雨强条件下,磷素流失途径均以侵蚀泥沙流失为主,分别平均占磷素流失总量的 94.4%、96.4%,说明雨强越大,通过泥沙流失的磷素占磷素流失总量的比例越大。在中、大雨强条件下,地表径流总磷流失占磷素总流失的比例分别平均 1.82%、2.04%,随雨强的增加略有增加,而地下径流总磷流失占磷素总流失的比例与地表径流相反,随雨强的增加而减少。

表 6 雨强及平衡施肥对磷素流失量的影响
Table 6 Effect of rain intensity and balanced fertilization on P loss

处理 Treatment		径流磷流失量			泥沙磷流失		总量 Total
		P loss runoff (kg·hm ⁻²)			P loss in sediment (kg·hm ⁻²)		
		地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff	总量 Total	全磷 Total P	有效磷 Avail. P	
小雨强	CK	0.000a	0.005a	0.005c	0.00d	0.000d	0.005d
Small rain	N1K	0.000a	0.004a	0.004c	0.00d	0.000d	0.004d
	N2K	0.000a	0.010a	0.010bc	0.00d	0.000d	0.010d
中雨强	CK	0.013a	0.010a	0.023a	0.68a	0.005ab	0.699a
Medium rain	N1K	0.002a	0.007a	0.009bc	0.13cd	0.001cd	0.139cd
	N2K	0.004a	0.011a	0.014abc	0.17c	0.001cd	0.184c
大雨强	CK	0.013a	0.005a	0.018ab	0.73a	0.006a	0.745a
Heavy rain	N1K	0.005a	0.007a	0.013abc	0.44b	0.002cd	0.456b
	N2K	0.012a	0.004a	0.016abc	0.34b	0.003bc	0.359b

2.4.3 雨强及平衡施肥对钾素流失量的影响

从表 7 可以看出,在 3 种施肥处理条件下,除地下径流总钾流失量外,地表径流总钾、径流总钾、泥沙全

钾、泥沙有效钾、钾流失总量均随雨强的增大有增大的趋势。

从表 7 可以看出,在中雨强条件下,施肥对钾素流失的影响表现为:地表径流总钾、地下径流总钾、径流总钾、泥沙全钾、泥沙有效钾、钾流失总量均以农户习惯施肥处理最高,高氮施肥处理次之,平衡施肥处理最小。在大雨强条件下,3 种施肥处理间地表径流总钾、地下径流总钾、径流总钾流失量的差异不大,而泥沙全钾流失量和钾流失总量由大到小的顺序均为:农户习惯施肥 > 平衡施肥 > 高氮施肥,说明在紫色土增施钾肥,增加植被覆盖度,减少钾素的流失。

雨强对钾素流失途径的影响表现为,在小雨强条件下,不产生地表径流和土壤侵蚀,钾素仅通过地下径流的途径流失,流失量较小,仅为 0.40 ~ 0.78 kg·hm⁻²;在中、大雨强条件下,钾素流失途径均以侵蚀泥沙流失为主,分别平均占钾素流失总量的 79.2%、90.8%,说明雨强越大,通过泥沙流失的钾素占钾素流失总量的比例越大。在中、大雨强条件下,地表径流总钾流失量占钾素总流失的比例分别平均 6.9%、5.7%,地下径流总钾流失占钾素总流失的比例分别平均为 13.9%、3.5%,均随雨强的增加而减少。侵蚀泥沙中有效钾的流失量占泥沙钾流失量较小比例,变化范围为 0.4% ~ 1.0%。

表 7 雨强及平衡施肥对钾素流失量的影响

Table 7 Effect of rain intensity and balanced fertilization on K loss

处理 Treatment		径流钾流失量 K loss runoff (kg·hm ⁻²)			泥沙钾流失 K loss in sediment (kg·hm ⁻²)		总量 Total
		地表径流 Surface runoff	地下径流 Subsurface runoff	总量 Total	全钾 Total K	有效钾 Avail. K	
小雨强	CK	0.00e	0.777a	0.78d	0.00e	0.00e	0.78e
Small rain	N1K	0.00e	0.397c	0.40e	0.00e	0.00e	0.4e
	N2K	0.00e	0.717a	0.72d	0.00e	0.00e	0.72e
中雨强	CK	0.79ab	0.82b	1.61a	12.56b	0.09bc	14.17b
Medium rain	N1K	0.27d	0.647d	0.92cd	2.49d	0.02de	3.41d
	N2K	0.33d	0.79d	1.12bc	3.51d	0.03cde	4.63d
大雨强	CK	0.86a	0.427a	1.29b	15.40a	0.12a	16.69a
Heavy rain	N1K	0.60c	0.487ab	1.08bc	14.03ab	0.05bcd	15.11ab
	N2K	0.67bc	0.403c	1.07c	7.29c	0.07b	8.36c

3 讨论

雨强是影响地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量的最主要因素。在小雨强条件下,无地表径流及土壤侵蚀发生;随着雨强的增大,地表径流量、径流总量及土壤侵蚀量都急剧增加。在 3 种雨强条件下,平衡施肥和高氮施肥两施钾处理产生的地表径流量、地下径流量、总径流量均小于农户习惯施肥处理(不施钾),表明增施钾肥提高了玉米冠层覆盖度,避免了雨滴对地表土壤的直接打击,减少了土壤结皮的产生,增大雨水的入渗量和蓄积量,从而减少径流量和土壤侵蚀量。

3 种雨强条件下,3 种施肥处理的地表径流、地下径流、径流总氮流失量和氮素流失总量均表现为:平衡施肥 < 农户习惯施肥 < 高氮施肥,说明平衡施肥能减少径流总氮流失量和氮素总流失量,而高氮施肥增加氮素的流失。侵蚀泥沙全氮流失量均随雨强的增大而增大。雨强对氮素总流失量影响不大。N 的损失量较大,在试验条件下平均达到 7.8kg/hm²,说明农田 N 的损失对环境的压力较大,并且再次证明紫色土农田 N 的损失途径主要是壤中流^[26],这与前人认为 N 主要通过泥沙损失的结果有较大差异^[27~30],主要是因为前人的研究没有考虑壤中流对 N 损失的影响,对 N 损失途径研究不够全面。针对紫色土 N 损失的特点,农田 N 损失对环境的压力应引起高度重视,要全面控制农田 N 损失对环境的压力,在采用横坡垄作、平衡施肥等保护性耕作的同时,还必须采取增厚土层、提高土壤有机质等土壤培肥措施提高土壤保水蓄肥能力,减少壤中流,减少农田 N 的损失。

在 3 种施肥处理条件下,除地下径流总磷流失量外,地表径流总磷、径流总磷、泥沙全磷、泥沙有效磷流失

量、磷流失总量均随雨强的增大而增大。在中、大雨强条件下,农户习惯施肥处理的地表径流总磷、径流总磷、泥沙全磷、泥沙有效磷流失量、磷流失总量均高于平衡施肥和高氮施肥两种施钾处理,说明在紫色土坡耕地增施钾肥对磷素的流失有一定的控制作用。紫色土区农田 P 的损失量非常微小,并主要通过泥沙损失,基本不会对环境构成压力。

在 3 种施肥处理条件下,除地下径流总钾流失量外,地表径流总钾、径流总钾、泥沙全钾、泥沙有效钾、钾流失总量均随雨强的增大有增大的趋势。农户习惯施肥处理的钾流失总量高于平衡施肥和高氮施肥两种施钾处理,表明在紫色土坡耕地增施钾肥,增加植被覆盖度,减少钾素的流失。

4 结论

雨强是影响地表径流量及土壤侵蚀量的最主要因素。N 的主要损失途径是地下径流,而受雨强的影响较小。P、K 的损失载体主要是泥沙,雨强越大,土壤侵蚀量越大,P、K 损失量越大。有效养分的损失主要以径流为主,特别是有效 N, 99% 以上通过径流损失。径流中又以地下径流为主。因此,要控制有效 N 损失,必须控制地下径流。有效 N 的损失量也很大,在实验采用的 60mm 降雨条件下,每公顷平均损失量达 7.62kg。因此,农田 N 的损失是水体富营养化的重要 N 源。有效 P 的损失量非常微小,平均损失量不足 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1}$, 因此,水体富营养化 P 的主要来源不是农田。由于平衡施肥能提高玉米植株高度、覆盖度和面积指数,从而显著提高玉米产量。过量施 N 降低了玉米植株高度和覆盖度,造成减产。与农民习惯和过量施 N 相比,平衡施肥能够提高玉米冠层覆盖度,减少雨滴对地表土壤的直接打击,防止土壤结皮,增大了雨水的入渗量和蓄积量,从而减少径流总量,也减少了土壤养分流失。因此,平衡施肥不仅能够提高玉米产量,还能减少土壤侵蚀和养分损失,提高养分利用率,成为防治面源污染的重要措施之一。

References:

- [1] Quan W M, Yan L J. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 291–299.
- [2] Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, Zhang L X. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. *Science and Technology Review*, 2005, 23(4): 47–51.
- [3] Hamsen E M, Djurhuus J. Nitrate leaching as affected by long-term N fertilization on a coarse sand. *Soil Use and Management*, 1996, 12: 199–204.
- [4] Cookson W R, Rowarth J S, Cameron K C. The effect of autumn applied ^{15}N -labelled fertilizer on nitrate leaching in a cultivated soil during winter. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56: 99–107.
- [5] Havis R N, Alberts E E. Nutrient leaching from field-decomposed corn and soybean residue under simulated rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 6: 211–218.
- [6] Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop system in Sweden. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56: 139–152.
- [7] Bergström L F, Kirchmann H. Leaching of total nitrogen from nitrogen- 15 -labeled poultry manure and inorganic nitrogen fertilizer. *Journal of Environment Quality*, 1999, 28: 1283–1290.
- [8] Wang Z H, Li S X, Wang X N, Su T. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors. *Soils*, 2006, 38(6): 676–681.
- [9] Wang H, Wang Q J, Shao M A. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on Loess Plateau under rainfall conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 61–64.
- [10] Yu G F, Wu H T, Wei Y S, Mao B H. Study on nitrogen migration in purple soil and nitrogen uptake by rice. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 316–320.
- [11] Wang J Y, Wang S J, Chen Y, Zheng J C, Li C Y, Ji X J. Study on the nitrogen leaching in rice fields. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 28–36.
- [12] Wang D J, Lin J H, Xia L Z. Characteristics of nitrogen leaching of rice-wheat rotation field in Taihu Lake area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 16–18.
- [13] Sun B, Wang X X, Zhang T L. Influencing factors of leaching nutrients in red soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 257–262.
- [14] Ji X H, Zheng S X, Lu Y H, Liao Y L. Dynamics of floodwater nitrogen and its runoff loss, urea and controlled release nitrogen fertilizer application regulation in rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2521–2530.
- [15] Fu T, Ni J P, Wei C F, Xie D T. Research on the nutrient loss from purple soil under different rainfall intensities and slopes. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 71–74.

- [16] Kang L L, Zhu X Y, Wang Y Z, Wu Q, Wei Y C. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 536—543.
- [17] Ma K, Wang Z Q, Chen X, You L. Study on properties of nutrient loss from red soil in sloping land under different rainfall intensities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3): 16—19.
- [18] Li Z M, Tang S J, Zhang X W. *Purple Soil of China*. Beijing: Science Press, 1991.
- [19] Pang Q, Wang Y Q. Nutrients balance of farm eco-system and its non-point source pollution. *China Environmental Protection Industry*, 2004, (6): 17—19.
- [20] Zhang J H. Climate resource and evaluation in demonstration zone of soil protection of purple hilly area. *Soil Agriculture and Chemistry Bulletin*, 1992, 7(1-2): 96—104.
- [21] Yang W Y, Zhang Q, Zhang J H, Lin C W. Study on soil antiscourability in purple hilly area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(2): 23—28.
- [22] Lu R K. *Analysis Method of Soil and Agrichemistry*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999. 125—195.
- [23] Lin C W, Chen Y B, Huang J J, Tu S H. Temporal variation of plant height, plant cover and leaf area index in intercropped area of Sichuan, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7): 989—994.
- [24] Zhang L X, Li S X. Effects of application of N and K fertilizers on nitrogen metabolism of two genotype varieties of maize under water-stressed condition. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 554—556.
- [25] Catroux G, Schnitzer M. Chemical, spectroscopic, and biological characteristics of the organic matter in particle size fractions separated from and Aquoll. *Soil Science Soc Am J*, 1987, 51: 1200—1207.
- [26] Lin C W, Chen Y B, Huang J J, Tu S H, Pang L Y. Effect of different cultivation methods and rain intensity on soil nutrient loss from a purple soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(10): 2241—2249.
- [27] Xu F, Cai Q G, Wu S A, Zhang G Y. Effect of contour hedgerows on soil nutrient loss in slopeland. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 23—29.
- [28] Xu F, Cai Q G, Wu S A. Progress in research on nutrient processes of sloping agroforestry systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(1): 82—87.
- [29] Huang L, Ding S W, Dong Z, Cai Q G, Zhang G Y. Study on nutrient losses of purple soil in three gorges reservoir region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 8—12.
- [30] Jiang G Y, Shi D M, Lu X P, Liu Y M. Research on runoff and nutrient loss from slope-land of purple soil under different planting model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004 18(5): 54—58.

参考文献:

- [1] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施. *生态学报*, 2002, 22(3): 291~299.
- [2] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 张林秀. 我国农业面源污染的控制政策和措施. *科学导报*, 2005, 23(4): 47~51.
- [8] 王朝辉, 李生秀, 王西娜, 苏涛. 旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究. *土壤*, 2006, 38(6): 676~681.
- [9] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 61~64.
- [10] 余贵芬, 吴泓涛, 魏永胜, 毛炳衡. 氮在紫色土中的移动和水稻氮素利用率的研究. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(4): 316~320.
- [11] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 郑纪慈, 李超英, 计小江. 稻田土壤中氮素淋失的研究. *土壤学报*, 1996, 33(1): 28~36.
- [12] 王德建, 林静慧, 夏立忠. 太湖地区稻麦轮作农田氮素淋洗特点. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 16~18.
- [13] 孙波, 王兴祥, 张桃林. 红壤养分淋失的影响因子. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 257~262.
- [14] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 廖育林. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律. *中国农业科学*, 2006, 39(12): 2521~2530.
- [15] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 71~74.
- [16] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 吴卿, 魏义长. 不同雨强条件下黄土地土壤养分流失规律研究. *土壤学报*, 1999, 36(4): 536~543.
- [17] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 尤力. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 16~19.
- [18] 李仲明, 唐时嘉, 张先婉. *中国紫色土*. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 庞庆, 王益谦. 农田生态系统养分平衡及其面源污染研究——以四川省为例. *中国环保产业*, 2004, (6): 17~19.
- [20] 张建华. 紫色丘陵土壤保护示范区气候资源及评价. *土壤农化通报*, 1992, 7(1-2): 96~104.
- [21] 杨文元, 张奇, 张建华, 林超文. 紫色丘陵区土壤抗冲性研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(2): 23~28.
- [22] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 125~195.
- [23] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华. 四川间作地区作物高度、覆盖度和叶面积指数的动态变化. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 989~994.
- [25] 张立新, 李生秀. 水分胁迫下氮、钾对不同基因型夏玉米氮代谢的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 554~560.
- [26] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 涂仕华, 庞良玉. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2241~2249.
- [27] 许锋, 蔡强国, 吴淑安, 张光远. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 23~29.
- [28] 许锋, 蔡强国, 吴淑安. 坡地农林复合系统土壤养分过程研究进展. *水土保持学报*, 2000, 14(1): 82~87.
- [29] 黄丽, 丁树文, 董舟, 蔡强国, 张光远. 三峡库区紫色土养分流失的试验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 8~12.
- [30] 蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 刘玉民. 紫色土坡地不同种植模式下径流及养分流失研究. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 54~58.